

岩盤地下水流れの断層系による影響の考察

東京大学工学部 ○鈴木 猛 康

〃 小島 圭 二

1. はじめに

地下発電所、トンネル、石油・LNG地下備蓄、放射性廃棄物の地下保管等、近年数多くの地下施設の建設が盛んになり、それにともなって地下水の岩盤浸透機構の解明が急がれている。Porous Media中の流れと異なり岩盤中では、断層・破砕帯や節理が主要な水みちとなっている。本論文では、日本に典型的な断層系岩盤の地下水流れを支配する要因として、断層充填物質の性状、断層交差部の透水性、上載荷重の3つをあげ、これらの要因が地下水流れに及ぼす影響度を、数値解析によって評価、検討した。その結果興味深い結論が得られ、地下水流れのコントロールの意味でも重要と考えられるので、ここに報告する。

2. 断層の性状と上載荷重の影響

透水性の意味から、小島・鈴木・平本(1981)は、断層を地質性状で次の3つのタイプに分類している。

- 1) cleanな節理の密集帯
- 2) 角礫・細片化した断層破砕部
- 3) 粘土で充填された断層破砕部

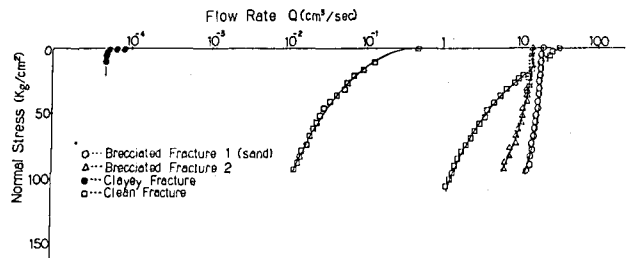


Fig. 1 上載荷重と透水性

Fig. 1は、それぞれのタイプの断層の透水性評価のため、円筒形岩石試料を軸方向に垂直に破断し、砂や粘土を間にはさむことによって断層破砕部をモデル化し、放射流を流した室内透水試験で得た上載圧と流量の関係をプロットしたものである。モデル化にあたって、Fig. 1から次のような特徴をあげることができる。

cleanな断層では、上載圧の増加にともなう透水性の低下が著しく、深度による透水係数の分布を考慮する必要があるが、破砕部や角礫・細片化した断層では、深度方向の透水係数の変化は比較的小さい。また粘土をはさむ断層では、地表近くのゆるみ領域を除いては、透水経路になりえないほど透水係数は小さい。

3. 断層系の地下水の移動

3. 1 断層を水みちとした地下水流れ

以上の点を考慮した2つの断層モデルを用い、断層の性状が実際の地下水流れに及ぼす影響度を、定常流の有限要素法による数値解析で検討した。モデルは地下空洞への湧水問題を取り扱っており、両モデル共に解析領域の上面で圧力水頭10m、側面に静水圧の境界条件下で解析を行なった。

Fig. 2はcleanな節理が密集した断層面に空洞が存在する場合のモデルであり、Fig. 3はその流速分布である。この場合空洞への湧水量は130l/min/m程度で、同様の条件下で破砕部や角礫・細片化した断層(透水係数 $k = 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$)を想定した解析では、湧水量は60l/min/mとなり、この例では上記の断層性状により、60~120l/min/mの範囲で湧水量が変化する。

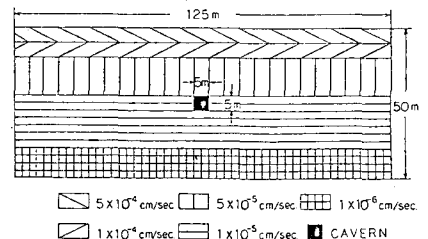


Fig. 2 透水係数分布

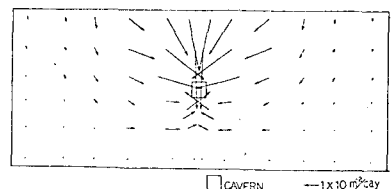


Fig. 3 流速分布

Fig. 4はトンネルに斜交してタイプの異なる断層が分布するモデルで、Fig. 5はこの場合の流速分布である。図中のFault 1はcleanな節理の密集部、Fault 2は破碎部が角礫・細片化した断層をモデル化している。

Fig. 5の流速分布に見られるように、断層が主要な透水経路となっており、まわりのインタクトな岩盤を通じての浸透は、無視できるほど小さい。

また同じ規模の断層であっても、その地質性状の違いによって、Fault 1とFault 2ではFig. 5で示されるように、湧水量に相当の差が生じることが予想される。

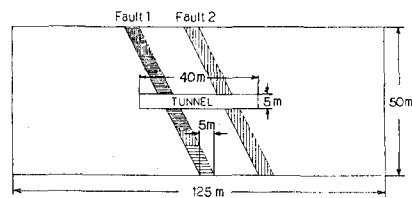


Fig. 4 透水係数分布

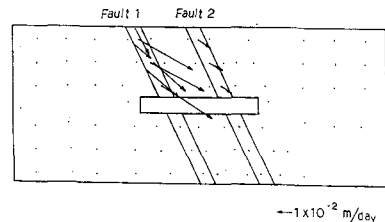


Fig. 5 流速分布

3.2 断層交差部の透水性の影響

断層が主要な透水経路であることを述べてきたが、現実の断層系では、その交差部が著しく破砕されている場合がしばしば見出される。

断層交差部の透水性による断層系の地下水流れへの影響を評価するために、

Fig. 6に示す断層交差モデルを用い、Fig. 6の境界条件、Fig. 7の透水係数の分布を与えて、定常状態で有限要素法による数値解析を行なった。Fig. 8は、Fig. 7に示される断層交差部の透水係数 k_f によって、断層への流入量 Q_1 、 Q_2 と、断層からの流出量 Q_1' 、 Q_2' がどのように変化するかを示したものであるが、断層交差部の透水性が、流量配分を決定する重要な要因となっていることがわかる。この解析結果から、次のように結論づけられる。

1) 上面からゾーン4への流入量は、 k_f がゾーン4の透水係数以下の場合は一一定値 $0.045 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ であり、 k_f が k_4 をこえると流入量は減少するが、再び一定値 $0.036 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ となる。それに対して、ゾーン4より大きな透水係数をもつゾーン2への流入量は、 k_f の増大とともに増加しつづける。

2) 断層下面からの流出量については、交差部以深の2本の断層の状態が同じなのにもかかわらず、 k_f が小さいほど交差部からそれぞれの断層への流量配分が異なり、 k_f が断層系の地下水流れで重要な役割を果たしていることがわかった。

Fig. 7におけるゾーン1の透水係数をゾーン2と同じく $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ にして、深度方向に透水性の変化のない、2本の透水係数の異なる断層が交差している場合には、それぞれの断層の流入・流出量は $Q_1 = Q_1'$ 、 $Q_2 = Q_2'$ で一致し、交差部の透水性により流量配分は変化しないがその絶対値が異なる。断層の傾斜が2本の断層で異なる場合でも、同様の結果を得ている。

この断層交差モデルは非常に単純なものであり、解析領域が交差部付近に限られている上に、交差部近くに一定圧力水頭境界があるので、交差部の透水性が広域的地下水流れに与える影

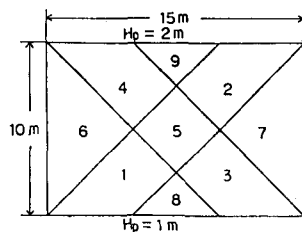


Fig. 6 交差モデル

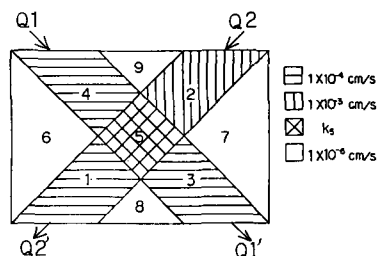


Fig. 7 透水係数分布

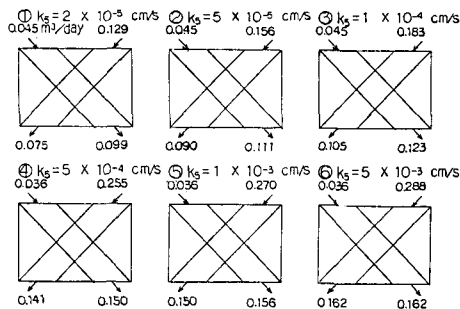


Fig. 8 流入量と流出量

響を十分表現できない。そこで現実的な岩盤浸透において、断層およびその交差部が広域的地下水流れに及ぼす影響度を評価するため、いくつかの断層交差部が存在するA花こう岩地域の地下空洞周辺岩盤をモデル化し、有限要素法による定常浸透流解析を試みた。

Fig. 9に空洞および断層の配置、透水係数、そして境界条件を示す。割れ目系岩盤の平均的な透水係数 $k_{mean} = 2.5 \times 10^{-6}$ cm/s、断層部の透水係数 $k_f = 1 \times 10^{-4}$ cm/sとし、断層交差部の透水係数 k_{fi} を 1×10^{-5} から 5×10^{-4} cm/sまで変化した。境界条件は水面固定、解析領域の左右端でFig. 9に示す左力水頭を固定するとともに、貯油槽と作業トンネルの境界で左力水頭を $H_p = 0$ (大気境界)とし、水封トンネルではE.L.±0.0mの水封圧をかけた。また有限要素メッシュは、貯油槽、作業トンネル、水封トンネルおよび断層系を考慮し、Fig. 10に示すように組んだ。

Fig. 11に、 $k_{fi} = 1 \times 10^{-4}$ cm/sの場合の流速分布を示す。このように断層系岩盤では、ほとんど断層を水みちとして地下水が移動する。トンネルや地下空洞における湧水の観察でも、断層や節理からの湧水が卓越している。

Fig. 12に、 $k_{fi} = 1 \times 10^{-4}$ cm/sの場合の間隙水圧分布を示す。比較のため、断層を考慮せず、透水係数 2.5×10^{-6} cm/sの均質等方岩盤での解析例を、Fig. 13に示した。均質等方岩盤の浸透流解析に、断層を含むFig. 10のメッシュを流用したために、Fig. 13にはその影響が多少認められるが、両者を比較すると、間隙水圧分布が断層の存在によってかなり異なっており、とくに水封トンネルと貯油槽の間で複雑になっている。水封トンネルの下方では、水封トンネルから流出した水が、断層交差部Aに向かって流れる様子が表れている。実際A花こう岩地域でも、均質等方の浸透流解析では解釈できない間隙水圧の分布が存在する。

そこで透水経路である断層中の地下水の流量と流向が、4つの断層交差部の透水性によつてどの程度変化するかに着目した。

Fig. 14は、Fig. 9の断層交差部Aにおいて、断層から交差部への流入量 Q_1 、 Q_2 と、交差部から断層への流出量 Q_3 が、交差部の透水係数 k_{fi} によって変化

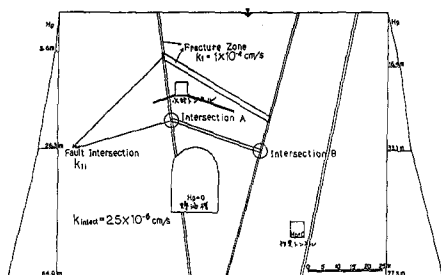


Fig. 9 地下空洞周辺岩盤モデル

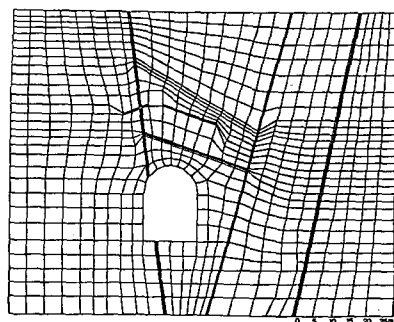


Fig. 10 有限要素メッシュ

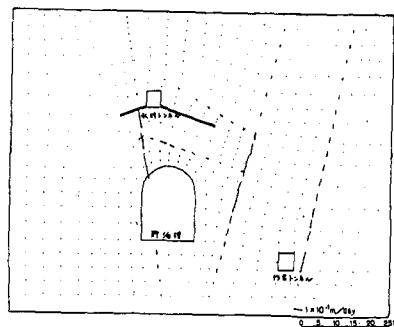


Fig. 11 流速分布

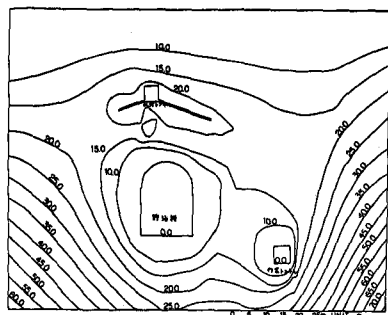


Fig. 12 間隙水圧分布
(断層モデル)

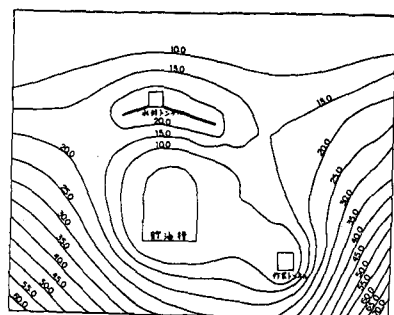


Fig. 13 間隙水圧分布
(均質等方岩盤モデル)

する様子をプロットしたものである。ここで注目されるのは、 k_{fi} が小さくて $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ の場合、 Q_2 の方が Q_1 よりも大であるにもかかわらず、 k_{fi} が $5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ で大きくなると逆に、 Q_1 の方が Q_2 よりも4倍近く多くなっていることである。断層交差部Bについて同様にプロットされたFig. 15でも、交差部から2本の断層への流量配分比が、 k_{fi} によって変化するのが顕著に表れている。このように断層中の水の流れは、断層の透水係数が場所によって異なる影響が大きいことは、断層の観察からも推定されるが、もう1つの要因として断層交差部の透水性も、水みちである断層中の流れを支配する重要な要因であると考えられ、地下水流れのコントロールの意味でも十分考慮されるべきである。

4. 断層系を考慮した地下水流れのコントロール

断層系岩盤においては、断層の規模、性状、分布状況、連続性で地下水流れが決定される。前述してきたように、断層交差部の透水性によつて、おのおのの断層中を流れる地下水の流量、流速や流れの方向が変わる。そこでグラウティング等によって交差部の透水性を変化させることによつて、地下水流れをコントロールすることも可能であろう。

一例として断層交差部の透水性を、グラウティング等により変化させた場合について示す。Fig. 16は断層交差部を、Fig. 17の右に示すようにグラウティングした場合の間隙水圧分布である。Fig. 12の分布と比較すると、水封トンネル下方の流れが分散するような分布となっており、また局所的に不飽和領域が生じている。断層から貯油槽への地下水流入量はFig. 17に示すように、約3割程度減少している。

このように主要な水みちである断層中の流速を変えたり、主要構造物周辺の流路を変更させる等、岩盤中の地下水流れをコントロールできる可能性が示された。これは例えば、漏油・漏気、RIの移動距離のようなことを考えただけでも、利用価値の可能性が予想される。

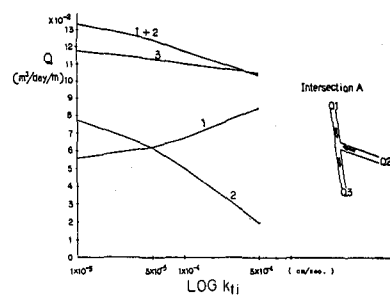


Fig. 14 断層中の地下水流量

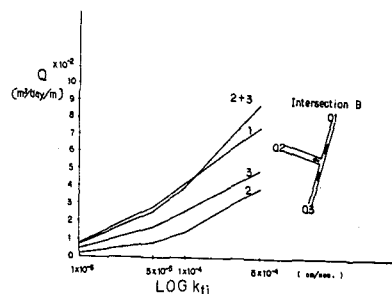


Fig. 15 断層中の地下水流量

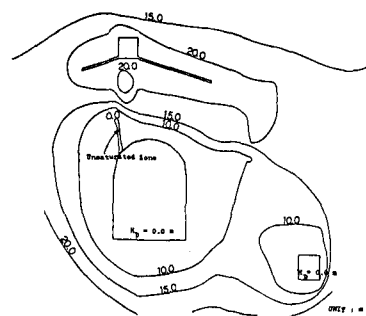


Fig. 16 間隙水圧分布

参考文献

- 1) 小島・鈴木・平本(1981): 岩盤浸透流解析における断層・破碎帯の透水性評価とその影響度, 土木学会 第36回年次学術講演会講演要目集

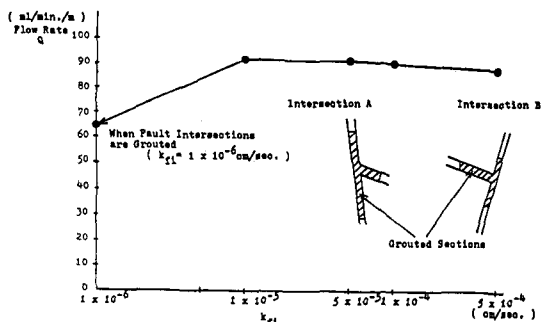


Fig. 17 グ라우ティング効果

Influences of Fault System on Groundwater Movement in Rock Mass

by Takeyasu SUZUKI and Keiji KOJIMA
Fac. of Engineering, University of Tokyo

SUMMARY

In most crystalline rock mass, groundwater flows mainly through faults or major fractures. The purposes of this paper are to pick up the factors which govern the flow in rock mass and show the influences of these factors by computer simulations. The following factors can be considered to determine the flow through faults.

- 1) Geological properties of faults.
- 2) Depth or overburden pressure.
- 3) Hydraulic characteristics of fault intersections.

As the first step, we classified the fault into three types as follows.

- a) Concentration of clean joints.
- b) Fault filled with brecciated materials.
- c) Fault filled with clay.

From our laboratory permeability test, it is clear that the permeability of each type of fault mentioned above differently decreases with normal stress or overburden pressure. The importance of taking account of geological properties of faults and overburden pressure is shown by computer simulations considering them.

In actual rock mass, some fault intersections exist. It will be shown that the third factor plays an important role on groundwater movement, i.e., flow rates through faults change considerably by the hydraulic conductivity of fault intersections and sometimes flow directions change. As the result of this fact, the possibility of groundwater control by the improvement of hydraulic conductivity of fault intersections can be considered. This possibility also is shown by computer simulations dealing with the flow around oil storage cavern when fault intersections are grouted.